

# Haptic PIVOT:VR中的按需应变手持设备

Robert Kovacs<sup>1,2</sup>, Eyal Ofek<sup>2</sup>, Mar Gonzalez Franco<sup>2</sup>, Alexa Fay Siu<sup>3,2</sup>, Sebastian Marwecki<sup>1</sup>, Christian Holz<sup>4,2</sup>, Mike Sinclair<sup>2</sup>

<sup>1</sup>波茨坦大学哈索-普拉特纳研究所, 波茨坦, 德国

<sup>2</sup>微软研究院, 美国雷德蒙<sup>3</sup>

斯坦福大学, 美国斯坦福<sup>4</sup>

苏黎世联邦理工学院, 瑞士苏黎世。

## ABSTRACT

我们提出了PIVOT, 一个佩戴在手腕上的触觉设备, 可以根据需要将虚拟物体呈现在用户的手中。它的简单设计包括一个单一的致动关节, 将触觉手柄拨入和拨出用户的手, 呈现出抓取、捕捉或投掷物体的触觉感觉--在空间的任何地方。与现有的手持式触觉设备和触觉手套不同, PIVOT在不使用时让用户的手掌保持自由, 使用户能够不受限制地使用他们的手。PIVOT还能在用户紧握手柄的同时, 通过主动驱动其电机, 渲染作用于所持虚拟物体的力量, 如重力、惯性或空气阻力。当双手戴上PIVOT设备时, 他们可以为双臂互动增加触觉反馈, 如举起较大的物体。在我们的用户研究中, 参与者( $n=12$ )对抓取和释放不同形状和大小的物体的真实性进行了评价, 在1到7的范围内平均得分为5.19分, 对以不同速度向不同方向抓取和投掷球的能力进行了评价(平均=5.5), 并验证了以约100克的增量呈现所持物体的比较重量的能力, 精确度为87%。

## 作者关键词

虚拟现实; 触觉反馈; VR控制器; 触觉代理。

## CSS的概念

• 以人为本的计算~人机交互 (HCI); 触觉设备;

## 简介

触觉VR控制器是与虚拟内容进行互动的基本设备。它们有各种各样的形状和功能, 从普通的手持式控制器[52]到触觉手套[29][42]。虽然大多数商业设备只提供振动触觉反馈, 但研究人员已经

展示了各种各样的手持控制器, 呈现出纹理[54]、形状[4]、抓握[10]和挤压反馈[36]、移动重量[55], 以及双手使用的触觉行为[49]。这些设备的一般缺点是, 它们与用户的手持续接触, 从而可能破坏自由手互动的感觉, 而且需要偶尔把它们放在一边, 以便在物理世界中使用手。

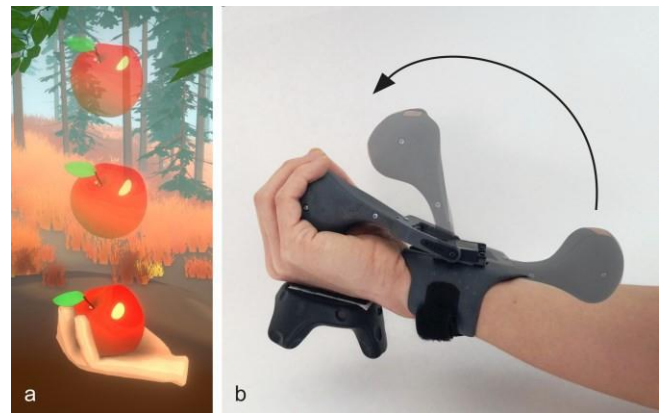


图1.PIVOT是一个戴在手腕上的触觉设备, 它有一个可旋转的手柄, 根据需要出现在用户的手中, 在虚拟现实呈现出抓取、捕捉和投掷手持物体。

另一种为虚拟环境创造触觉的方法是通过使用物理代理, 将其放置在VR中的真实空间中, 也就是遭遇型触觉。然而, 这种方法要么仅限于脚本化的体验, 要么需要昂贵的大型机械来动态地定位这些代理, 如机械臂[2]、移动平台[18], 或者涉及多个人类助手[7]。虽然所提供的触觉保真度很高, 但这种方法最常见的限制是有限的工作空间和启动速度。

为了结合这两种方法的优点, 即手持式触觉设备的多功能性和物理代理的高真实性, 我们提出了PIVOT, 一种戴在手腕上的触觉设备, 通过将一个通用的触觉代理转到用户的手上, 可以在空间的任何地方抓取虚拟物体, 如图1所示。这大大减少了用户参与、脱离和重新参与的努力。

允许为个人或课堂使用本作品的全部或部分制作数字或硬拷贝, 不收取任何费用, 但拷贝不得以营利或商业利益为目的而制作或分发, 且拷贝首页须注明本通知和完整的引文。必须尊重ACM以外的其他人拥有的本作品的版权。允许摘录并注明出处。以其他方式复制, 或重新发表, 张贴在服务器上或重新分发到名单上, 需要事先获得特别许可和/或付费。请向[Permissions@acm.org](mailto:Permissions@acm.org)申请许可。

UIST 2020, 2020年10月20-23日, 美国明尼苏达州的明尼阿波利斯。

ACM © 2020 版权由所有者/作者持有。出版授权给ACM。ACM ISBN 978-1-4503-6708-0/20/04...\$15.00。

DOI: <https://doi.org/10.1145/3313831.XXXXXXX>

\*根据你的权利审查确认书(接受后提供)更新上述区块和DOI

与虚拟物体；并且在设备不使用时释放用户的手。PIVOT根据虚拟物体的接近程度来定位其手柄，提供了自然的抓取能力，并呈现出匹配的物体手部碰撞。握住这个物理代理，再加上快速驱动机制，可以实现敏捷的操作，如抓取和投掷。PIVOT还可以在用户紧握手柄的同时，通过主动驱动手柄来渲染作用于被抓取的虚拟物体的动态力。

图2显示了PIVOT，一个触觉的VR控制器，它。

- (1) 渲染抓取和释放静态物体的触觉。
- (2) 能够捕捉和投掷飞行物。
- (3) 模拟由被抓物体提供的动态力，如重量、惯性或阻力；以及
- (4) 必要时允许自由使用双手。



图2.PIVOT的关键设计元素是驱动的枢轴手柄与用户的前臂接地。

PIVOT的手柄作为一个通用代理，同时还提供与传统VR控制器类似的人体工程学和功能，包括触摸感应、触发按钮和振动触觉反馈。该设备的设计包括一个用于弯曲手腕运动的可背驱动的电动铰链和一个额外的被动的桡骨铰链，使手在握住手柄的时候可以侧向移动（这里：上下移动）。

在我们的用户研究中，参与者评估了三个任务：（1）抓取不同形状和大小的物体，（2）在不同方向和速度下抓取和投掷一个球，以及（3）重量渲染的有效性。我们发现，PIVOT的通用形状的手柄可以在 $5\pm 2\text{cm}$ 的范围内有效呈现不同形状和大小的物体。在模拟捕捉和投掷以25米/秒的高速运动的物体时，该设备表现良好。参与者还能够估计不同物体的重量，并以明显的准确性进行比较。

#### 相关的工作

本文的工作建立在触觉和VR控制器领域的大量研究之上。这些触觉装置从世界范围内的固定装置。

通过触觉代理、手持式控制器和可穿戴的触觉手套。PIVOT与这些设备中的许多都有相似之处。

#### 以世界为基础的触觉设备和代理机构

接地式触觉设备有可能提供具有真实力感的触觉反馈，与用户的输入力相匹配，并在原地停止或阻碍其运动。接地式力反馈设备的例子包括Novint Falcon[44]、PHANTOM[38]、HIRO[22]、或SPIDAR[40]。

接地力反馈设备可以作为遭遇型设备，能够在自由空间和与虚拟物体的触觉接触之间呈现出真实的过渡。这些设备与手指碰撞，只有在虚拟环境中发生接触时才显示交互力。例子包括TouchMover[16]、H-Wall[12]、RoomShift[18]、Snake Charmer[2]和Haptic-go-round[33]。正如Tinguy等人[21]所研究的那样，安装在这些设备上的触觉代理可能与虚拟对应物有一定的形状和大小差异。此外，触觉重定向技术可以减少空间上的不匹配，如[3][8]。总的来说，触觉代理与机器人设备相结合，呈现出真实的触觉体验，但需要一个大型的、固定的设置，并将互动限制在设备的操作空间内。

#### 手持式触觉控制器

手持式控制器通常提供触觉力反馈，以用户的手掌为基础，或通过重量转移和手指层面的陀螺仪效应。这些控制器的主要好处是它们可以随身携带，没有大型固定机器的限制。最近，许多触觉VR控制器已经被开发出来，呈现出富有表现力的触觉感觉。然而，它们的缺点是，在使用过程中，它们一直占据着手。如果用户在使用VR时将其放下，就需要在环境中追踪这些控制器，以便以后可以找到它们。

超越了振动触觉电机的有限触觉，研究人员在控制器上安装了仪器，以呈现运动学效果，模拟持有虚拟物体。根据物体的相互作用，一些控制器移动内部重物来物理地转移重心[45][50][55]。类似的效果已经通过以不同的速度移动多个内部质量来创造不同重量的印象而得到证明[1]。有几种尝试来再现外力的感觉。例如，使用外部万向轮[41][53]、空气移动螺旋桨[30][34]，或通过改变设备的空气阻力[56]。

另一类触觉控制器在用户握住和移动控制器时，在用户的手指上产生触觉和体感效果。例如，Haptic Revolver[54]在手指下旋转一个轮子来呈现不同材料的剪切力。NormalTouch、TextureTouch [4] 和

CLAW[10]是利用倾斜和挤压平台创造触摸虚拟形状的感觉的控制器。

最后，设计了几个触觉控制器来支持抓取虚拟物体。TORC[36]是一个没有移动部件的控制器，它可以感知所施加的力，并在抓取过程中施加压力时通过单独振动指垫表面来模拟抓取。CLAW[10]、CapstanCrunch[17]和PaCaPa[46]是带有可移动手臂的触觉控制器，可以通过用户手指下的振动产生触觉、抓握力反馈和物体纹理。Haptic Links[49]动态地锁定和解锁两个具有可变硬度的控制器，以支持VR中的双臂任务。

与现有的原型相比，PIVOT的外形尺寸可以纳入它们的一些优点，例如使用力传感器和音圈致动器[36]提供顺应感，同时保留了自由使用双手的能力，而不需要移除装置。

### 可穿戴的触觉设备

可穿戴触觉设备通常以手套或外骨骼的形式出现，完全或部分覆盖用户的双手。它们可以在互动过程中呈现触摸和抓握效果，模拟出令人信服的触觉。

在其最小的外形中，可穿戴触觉设备是安装在手指上的执行器，可以在用户的指尖上呈现纹理[25]和剪切[43]力的感觉。这些效果也可以用来呈现抓取物体时的接触，并通过指垫的变形来模拟物体的重量[39]。

外骨骼装置通常将接地力反应转到身体的另一个部分。它们被开发成多种样式，类似于人体，如外部肌腱[37]、柔性金属条[31]或沿手部外部的指骨复制品[28]，这为互动和抓取提供了空间，同时呈现反馈。还有一些采用了手内设计，因此在用户的手掌中，每个手指都与一个执行器相匹配。

[6]或以手套的形式出现[48]。电阻式版本可以在抓取过程中通过卡住刹车[58]或锁定滑块来产生大的阻力，例如在狼入[9]中。TouchVR[51]是一个安装在手上的触觉设备，它使用一个小型三角肌机器人在手掌中间产生触觉。Leigh和Maes[13][14]开发了身体集成的机器人关节界面，用额外的手指增强人的手，也可以作为一个按需的操纵杆或触发按钮。其他研究人员探索了可充气的设备，通过在手掌中间的气囊充气来呈现虚拟的可抓取物体[11][20]。特别是PuPop[20]通过大量的集成气囊提供了各种形状和尺寸的渲染，然而它的气动驱动机制只适合于缓慢的交互场景。

在一些例子中，外骨骼类型的触觉设备被接地到更远的身体部位。Wireality[23]连接了

而Siu等人[19]和Zhao等人[57]提出了一种躯干接地的设备，用于探索盲人的虚拟环境。PIVOT与此相关，因为它将设备固定在用户的前臂上，同时向手部提供触觉感受。最后，Level-

Ups[15]是快速驱动的电动脚部延伸装置，可以及时模拟虚拟楼梯的台阶，与PIVOT的快速驱动机制类似。

虽然触觉手套和外骨骼产生的触觉可以有很高的保真度，但它们使用的主要开销是它们的重量和在佩戴者手上的体现，这往往限制了全面的运动和灵活性。PIVOT与这些设备有相似之处，即它也是穿戴在身上的，然而，它的末端执行器并不与用户持续接触，而是在需要时才接触。这些特质可以将PIVOT归类为 *可穿戴-接触型* 触觉设备。

### PIVOT在VR中的应用

PIVOT的核心元素是固定在用户前臂上的旋转手柄，由一个伺服电机驱动。这个简单的设计是我们在本节中描述的几种触觉效果和交互技术的关键促成因素。在所有情况下，用户的手的位置都是用6DoF VIVE[52]追踪器堆叠在用户的手掌背面来追踪的。

### 触摸和抓取虚拟物体

PIVOT的主要能力是为获取、抓取和释放虚拟物体提供触觉感受。如图3所示，当用户伸手去抓一个物体时，PIVOT将其手柄向用户的手按比例移动，与虚拟物体的距离成比例。因此，PIVOT的手柄会与虚拟物体同步接触到用户的手。

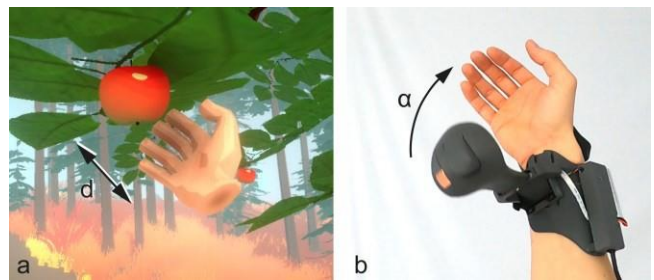


图3：(a)当伸手去拿一个虚拟物体时，(b)PIVOT将其手柄向用户的手反比例地旋转，与虚拟物体的距离成正比。

当用户抓住手柄的那一刻，PIVOT关闭其电机，使用户有可能被动地移动手柄。除此之外，被动的桡骨铰链允许手腕以自由和自然的方式进行侧向运动。因此，抓取和握住一个虚拟物体不会将手锁定在前臂上，而是看起来物体

"被握在手中。抓取虚拟物体和握住PIVOT的手柄之间的模拟耦合，创造了一种引人注目的感觉，即以直接和自然的方式获得一个物体。



### 捕捉和投掷

利用其快速启动机制，PIVOT可以自然地呈现出对投掷和抓取虚拟物体的触觉反馈。与抓取静止物体的主要区别在于PIVOT预测与飞行物体接触的过程循环。当一个潜在的物体飞向手时，PIVOT开始提前移动手柄，考虑到系统的延迟，并在用户期望物体接触的时候把它放在用户的手中。

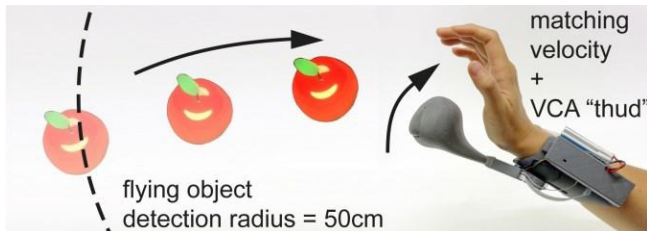


图4.当检测到一个物体以高于0.5米/秒的速度接近用户的手时，PIVOT预测接触的时刻，并提前开始移动其手柄，以便在正确的时刻产生触觉碰撞的感觉。

对于投掷物体，PIVOT只需要使用手柄表面的触摸敏感区检测用户何时放开手柄。当手指被抬起时，PIVOT启动电机，驱动手柄离开手掌，同时以投掷速度将虚拟物体从虚拟手掌模型中分离出来。由于释放信号的延迟，投掷速度矢量被确定为手开始减速前的最高速度。

### 力量渲染

除了触摸反馈，PIVOT还能产生一种作用在手持虚拟物体上的动态力的感觉，如重力、弹力、惯性或阻力。它通过不断地驱动其手柄电机来实现这一功能，同时它被用户牢牢抓住。

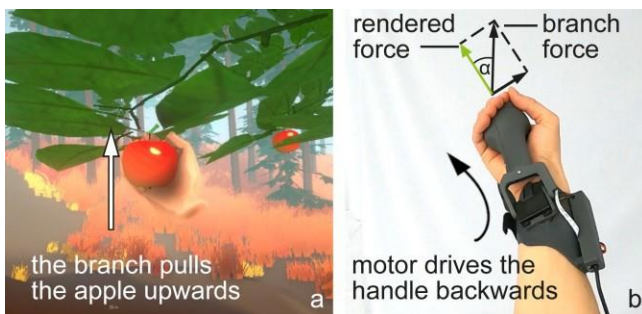


图5.PIVOT通过在被抓的时候主动驱动它的手柄来渲染树枝的弹力的法向分量。

如图5所示，在摘苹果的例子中，PIVOT通过主动驱动手柄离开用户的手，渲染了树枝的弹力。力量的强度是随着树枝的变形而变化的。

支（见补充视频）。由于PIVOT的手柄只有一个活动的自由度，它渲染了力的垂直分量到手掌上，如图5b所示。这样，当手掌朝上时，用户可以感受到力的强度，而如果手掌与力的方向平行，就无法感受到力。尽管有这个限制，PIVOT仍然呈现出令人信服的力的感觉（见用户研究部分）。

在苹果被摘下的那一刻，力矢量转换为重力，并开始向下滑动苹果。相应地，PIVOT的手柄电机扭转方向，开始向手上推，以类似的方式模拟重力。为了增加撕裂苹果的感知真实性，手柄中的内置音圈致动器（VCA）发挥了触觉的“砰”的感觉。当投掷苹果时，惯性矢量也被计算出来并加入到渲染的力中，这样用户就能感知到加速的质量的感觉。以类似的方式，指向任何方向的力都可以通过将其强度投射到垂直于手掌平面的轴上来呈现（例如，用于呈现空气阻力或粘性摩擦）。

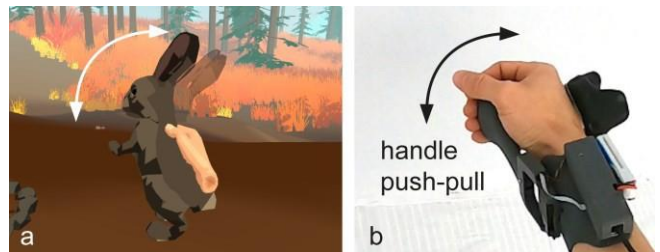


图6.用户通过PIVOT的手柄被来回驱动，感受到摆动的小兔子的惯性。

图6显示了一个为动态动画对象渲染力反馈的例子，例如一只扭动的兔子。用户通过快速驱动PIVOT的手柄来感知摇摆的兔子的惯性。

PIVOT还支持双手操作，对较大和较重的虚拟物体呈现触觉反馈。由于该设备不能在物理上将两只手限制在一起，它将大型物体渲染成顺应性的，并在两只手上应用耦合力反馈。

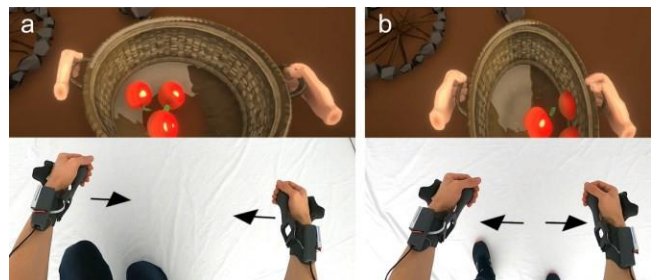


图7.在双臂上佩戴PIVOT可以为双臂互动提供触觉反馈。在这里，用户正在拉伸和压缩一个篮子，这被呈现为双手的同步推拉力。

图7显示了一个用户在VR中抬起一个篮子，每只手都戴着一个PIVOT装置。每个PIVOT都单独渲染了相应的力在各自的手上，这就造成了两只手都被所持物体物理连接的印象。如图7a所示，当用户拉伸篮子时，两个设备都以相同的强度向内拉动双手，并与拉伸程度成正比。同样地，将手柄压得更紧，会产生向外推的感觉（图7b）。

### 自由使用和按需召唤

PIVOT的主要好处之一是它能让用户自由使用他们的手。如图8a所示，折叠的空闲状态提供了自由的手部互动，如将手放在桌子上，操作有形物体，如键盘和鼠标，或放置耳机（图8b - 图片来自用户研究）。

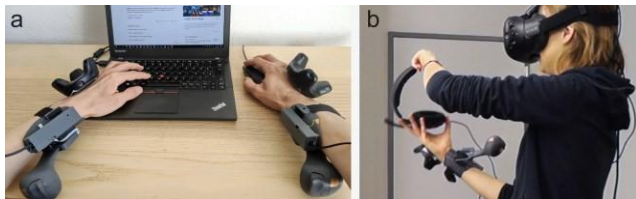


图8.PIVOT的设计使人们能够在现实世界中自然地使用双手，例如，操作电脑或放置耳机。

用户可以在VR中随时召唤PIVOT的手柄，只要做一个类似于抓溜溜球的手势。PIVOT的内部加速器检测到这一动作，并主动将手柄送入用户的手中。手柄可以随时以类似的方式被卸下，只需做一个落下的动作，加速计再次检测到这个动作，并将手柄从手掌中拔出。这个手势可以用来在VR中获得一个任意的看不见的物体，就像补充视频中的手电筒例子，或者使用PIVOT的手柄充当VR控制器，与虚拟内容进行互动。这样做的好处是，在需要的时候，控制器总是在手边，而不需要在房间里寻找并拿起它，而且在不使用的时候，手仍然是自由的。

这一功能被设想为在AR场景中特别有用，因为许多任务涉及到物理和虚拟方面，而且用户在可触摸的现实世界的负担（例如，一个需要修理的电器）和覆盖的虚拟内容之间切换注意力。虽然与现实世界的互动需要自由的手，因为物理对象提供了自然的触觉反馈，但PIVOT可以补充虚拟覆盖的触觉线索，否则就会丢失。

### PIVOT的硬件实现

PIVOT的实施包括一个机械系统、定制电子装置、控制固件和前端软件。

在VR中的元素。图9显示了PIVOT的主要硬件组件的概况。除了与电脑的USB连接外，该设备是自成一体的，它也有可能是无线的。

该设备配备了一个32位、180兆赫的Teensy 3.6微控制器，用于控制伺服电机、收集感官信息并与PC机进行通信。图10显示了整个系统的框图。

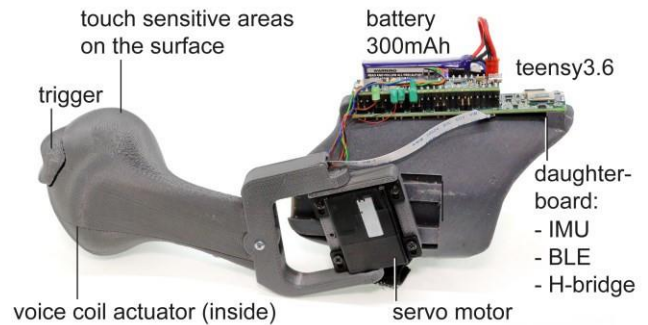


图9.PIVOT的功能元素：触摸传感器、音圈执行器（VCA）、带H桥子板的Teensy微控制器和一个改装的RC伺服电机。

为了追踪用户的手，我们使用了一个商业的VIVE[52]追踪器。为了让用户的手掌完全自由地抓握，追踪器用双面胶（从皮肤安全的EMS电极上重复使用）固定在手背上。另外，手掌上的弹性带也可以达到这个目的。

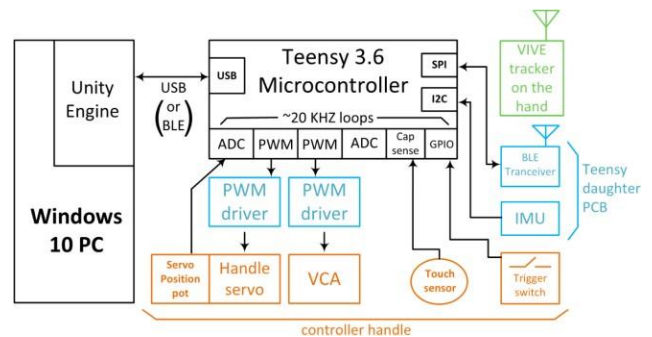


图10.PIVOT的系统图

PIVOT使用USB的串行通信接口与PC连接。这允许低延迟（<1毫秒）的轮询，这对实时的触觉体验至关重要。尽管子板也配备了一个BLE5通信模块，但我们发现由此产生的延迟（15-25毫秒）会使触觉体验恶化。



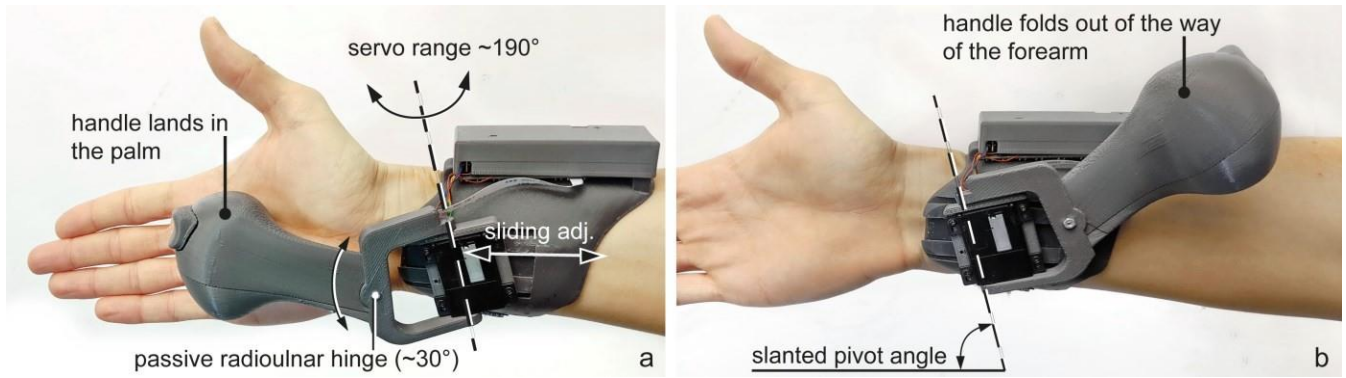


图11.PIVOT的机械设计：伺服装置主动围绕倾斜的垂直轴转动手柄，而手柄提供被动的膝关节运动，以适应手的自然倾斜。袖上的滑轨支架可以根据个人的手型进行调整。

### 机械设计

PIVOT的关键元素是单伺服旋转手柄。这一设计决定的主要功能是在需要时将手柄移到用户的手掌中，而在不使用时将其移开。手柄的角度和旋转轴的选择是经过深思熟虑的。如图11所示，手柄的旋转轴并不完全垂直于手掌，而是略有倾斜。这一点很重要，因为它可以使手柄在旋转到手掌时不与拇指发生干涉，并且在与现实世界的物体互动时或在桌子上休息时闲置在用户手臂旁边的位置，对手的干涉最小（图8a）。水平滑动调整允许用户调整设备的大小，因此袖口可以放在靠近手腕关节的地方，而手柄仍然打在手掌的中间。这确保了前臂的扭转对设备相对于手的旋转影响最小。

图12显示了手柄底部额外的被动式桡骨铰链，使手的自由运动达到了

啮合期间 $\pm 30^\circ$ （在手掌平面内旋转）。这种被动关节是一种摩擦配合，当使用者紧紧抓住手柄时就会进行调整。

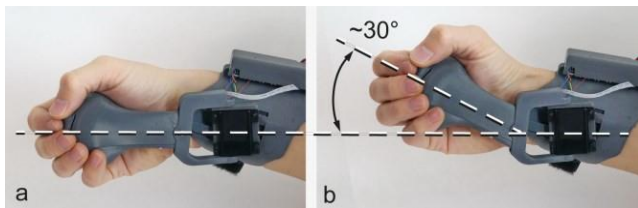


图12.被动的、基于摩擦的桡骨铰链使手在握住手柄时能够移动（这里：向上-向下）。

PIVOT的手铐是由柔性材料（Form2

Flexible）3D打印而成，以适应不同的手臂直径和形状。戴上控制器后，手铐的弹簧式行为会拥抱用户的手臂，使其有一个舒适而牢固的支撑。一条弹性尼龙搭扣带将袖带固定在前臂上。控制器的所有其他部分都是由硬质ABS材料3D打印而成。

配备的设备重达188克，包括一个350mAh的电池。此外，安装在手背上的VIVE追踪器的重量为89克。设计PIVOT的关键目标是使旋转手柄尽可能轻，以减少加速时的惯性力。如图13所示，PIVOT的外壳是一个薄（1毫米）的壁结构，其手柄只包含基本部件，使手柄的重量降至45克。

### 执行和电机控制

为了驱动PIVOT的手柄，我们修改了一个现成的遥控伺服电机（Hitec HS-7115TH），以获得对以下方面的控制：（1）扭矩和速度，（2）反向驱动能力，以及（3）实时位置反馈。有了这个定制功能，我们对PIVOT的手柄进行控制，使其以合适的速度到达用户的手上，施加所需的力，并可以随时关闭，使手柄被动旋转。

为了实现这一目标，我们拆除了伺服电机的原始控制电路，用我们定制的驱动电子元件和运行在Teensy控制器上的软件取代了它。所实现的PID回路允许高峰值电流以实现更高的速度，实现了扭矩控制，它还实现了基于时间的保护机制，以保护电机，以防它出现过功率。

为了测量该设备能够提供的力，我们在120毫米长的手柄末端安装了一个牛顿表。在电机全功率下，我们测量了3.5N的力，这相当于42N/cm的电机扭矩（由于定制的电子元件，略高于伺服电机的数据表值（39N/cm））。这实际上意味着该装置能够在手掌上呈现大约350克的重量。在最大速度下，手柄从一端位置到另一端（约190°）所需的驱动时间约为340ms。

### 电子和输入感应

PIVOT的控制板建立在一个Teensy

3.6[47]微控制器上，与一个定制的I/O子板连接。这块子板包含了电机驱动器、VCA

PWM电路、一个用于检测手的惯性传感器和一个用于检测手的传感器。

一个用于无线通信的BLE5芯片（Nordic nrf52832）（仅在实验中使用），以及用于处理来自舵机的电位器编码器的模拟信号的运算放大器。直接读取电位器的绝对位置，使前端软件能够始终了解或当前手柄的位置，即使是在电机关闭时。

图13显示了包含触发器、电容感应和VCA的手柄内部。我们使用Teensy内置的有源负载[26]电容感应功能来检测放置在手柄内部四个不同位置的铜基贴片上的触摸。手柄还包含一个VCA来呈现振动触觉反馈，以及一个在VR控制器中常见的触发按钮。

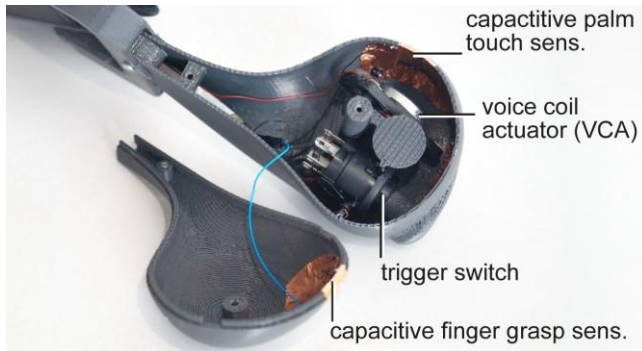


图13.手柄的内部包含：一个触发开关，电容式触摸感应铜带，以及一个VCA。

四个触摸感应斑块的位置是为了区分不同的抓握方式，并帮助PIVOT预测用户的抓握或释放的意图。第一个电容感应区面向手掌，在抓握时首先接触到手掌，表明手柄到达手掌。为了检测牢固的抓握，电容感应区大致放在中指和无名指的指尖下。此外，还有两个补丁专门用于检测大拇指的位置，以便为VR控制器的使用情况提供一个粗略的位置输入。

#### 软件实施

我们使用Unity

2019游戏引擎作为我们的软件平台，在配备了VIVE Pro VR系统的Alienware

15

R3笔记本电脑上运行。Unity以每秒90帧的速度保持交互空间中所有虚拟物体的表现，以及用户头部和用户手掌上的追踪器的位置和方向。

如图14所示，PIVOT不断检查用户手周围的球形“触发体积”。当在30厘米范围内（即在PIVOT的准备半径范围内）发现一个物体时，手柄以中等速度移动到准备位置。这就减少了在用户迅速伸手拿起虚拟物体的情况下后期物理接触的延迟。即使在准备位置，手柄也不会干扰到用户的手掌，因此不会被注意到。当

当距离小于10厘米时（图14比例半径），手柄开始动态地采用与目标物体的距离成比例的角度。当手柄被用户抓住时，只要在手柄上检测到触摸，虚拟物体就被设定为跟随手部运动。当手打开时，物体从Unity的手部物体中释放出来，物理力被启用，所以物体继续飞行。被释放的物体的动能是通过给它分配释放时的手的速度来设置的。为了考虑到触摸检测的信号延迟（约1-2ms），我们给物体分配最高的速度，在物体释放前的一个小的时间窗口内测量（约0.5秒）。

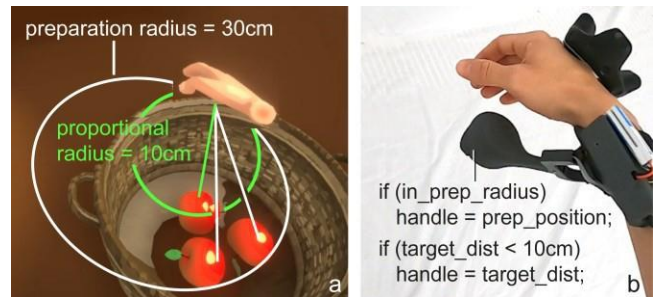


图14.当伸手拿起一个物体时，PIVOT检查与周围物体的距离。如果一个物体在30厘米的半径内，手柄会以中等速度移动到准备位置。当目标距离变得比10厘米更近时，手柄开始随着距离的减少而不断向手部靠近。

为了实现对物体的真实抓取，我们通过从每个指尖向被抓取物体的中心投射一条射线来对虚拟手部模型的手指进行动画。每条射线与物体表面的交点就是指尖的抓取位置。手指的关节是用FinalIK[24]的逆运动学引擎制作的动画。

#### 用户研究

我们进行了一项用户研究，以评估PIVOT模拟的能力：

（1）对各种物体的抓取感觉，（2）以不同的速度和方向抓取和投掷物体，以及（3）物体重量的错觉。我们招募了12名参与者（年龄19-26岁，平均22岁）。每位参与者在VR中使用PIVOT完成了一系列任务。在每个任务结束后，参与者还完成了一份离线调查问卷。

#### 任务1. 抓取不同形状和大小的物体

在第一个任务中，我们测量了PIVOT呈现抓取感觉的能力。我们要求参与者向不同大小（图15，1-4）和形状（5-9）的虚拟物体伸手，抓住，移动和释放。请注意，尺寸范围包括扳手的手柄和杯子的手柄的直径，但不是整个物体。

#### 结果

参与者在回答问题时对他们的经验进行了评分

"抓握式触觉体验的真实感如何？"

在HMD内直接用1（完全不真实）到5（非常真实）的Likert评分。

参与者认为拿着5厘米的球体（与PIVOT的手柄最相似的形状，o3）和直径在 $\pm 2$ 厘米的公差范围内（o2）是很现实的（平均得分3.9）。超过这个范围的物体（o1和o4）不被认为是现实的（ $V = 66$ ,  $p < 0.01$ ）。这表明用户接受物体的视觉和实际尺寸之间的轻微差异。

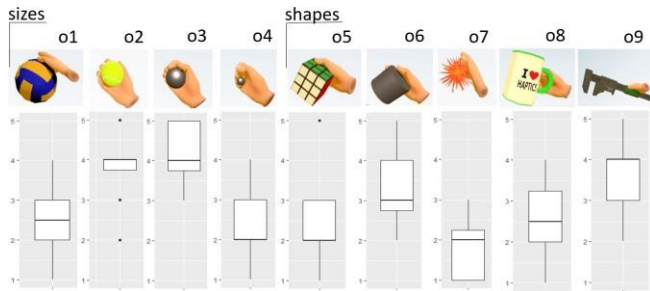


图15.任务1。抓取不同形状和大小的物体。我们向参与者展示了。(o1)一个比PIVOT的手掌大的球（12厘米），(o2)一个网球（7厘米），(o3)一个和PIVOT的手掌差不多大的球（5厘米），以及(o4)一个小球（1.5厘米）。此外，参与者还与之互动。(o5)一个魔方（7厘米），(o6)一个圆柱体（7厘米），(o7)一个带刺的球体（7厘米），(o8)一个杯子（2厘米手柄），和(o9)一个扳手（4厘米手柄）。

参与者对不同形状（o5-o9）的物体评价较低，尽管它们的整体尺寸在 $5 \pm 2$ 厘米的公认范围内。偏离球体的形状被认为是不太现实的。例如，带刺的o7（平均得分1.9）被评为最低（ $V = 78$ ,  $p < 0.01$ ）。物体o5和o8表现低下（平均分2.16）。物体o6和o9的表现明显更好（ $V=0$ ,  $p < 0.01$ ），平均得分3.35。我们假设o6和o9表现良好，因为它们的圆柱形形状与PIVOT的略带椭圆的手柄形状相差不大。由于手只覆盖了手柄的一部分，它的感知似乎与圆柱体相似。

在实验的虚拟部分结束后填写的调查问卷中，参与者陈述了他们对一组从1（完全不同意）到7（完全同意）的李克特量表的同意程度。参与者认为使用PIVOT抓取物体是一种现实的互动（Q1：“抓取物体的感觉很现实”，平均数=5.19,  $SD=0.45$ , 单样本Wilcoxon签名排名对 $\mu=0$ ,  $P<0.01$ ），并且很高兴有触觉（Q2：“我喜欢有触觉反馈”，平均数=5.9,  $SD=0.28$ ,  $P<0.001$ ）。他们认为他们的手接触到了虚拟物体（Q3：“感觉我的手直接接触到了虚拟物体”，平均值=5.4,  $SD=0.8$ ,  $P<0.01$ ），而不是一个与物体连接的设备（Q4：“感觉我的手抓住了一个设备而不是物体”，平均值=4.25,  $SD=1$ ,  $P=0.4$ ，Q3与Q4配对比较， $P<0.05$ ）。这些结果突出了控制器的人体工程学设计。

## 任务2：抓取和投掷虚拟物体

在第二项任务中，我们测量了PIVOT实现接球和投球的能力。此外，我们的目的是确定在接住和抛来自不同方向的球时潜在的人体工程学差异。尽管PIVOT与用户的手在空间中一起移动，但当手掌朝上、朝下、朝前或朝侧时，在捕捉和投掷方面存在某些解剖学差异。我们的任务是让参与者接住一个从四种不同方向（前面、侧面、下面、上面）从两米外扔过来的虚拟球。他们重复这个任务四次，并改变球的抛出速度，每次重复四次，速度越来越快（4米/秒、9米/秒、16米/秒和25米/秒）。为了说明系统在接住快速球时的延迟，球没有弹开或穿透手掌，而是拍打在手上。这使所有参与者在所有的速度和个人技能方面都有类似的、令人满意的体验。在每个球之后，参与者被要求以大致相同的速度将球扔回它来的方向。

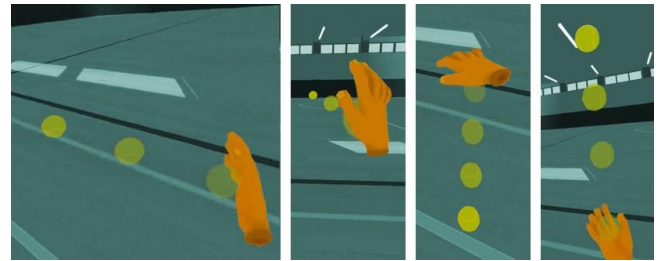


图16.任务2：以不同的速度从不同的方向（这里：侧面、前面、上面和下面）接住和投掷球。

## 结果

每次试验后，参与者被要求对触觉体验的真实性进行评分，“接球/投掷的触觉体验感觉有多真实？”在HMD内直接用1（完全不真实）到5（非常真实）的李克特量表进行评分。我们汇总了每个不同速度和捕捉/投掷方向的所有反应。

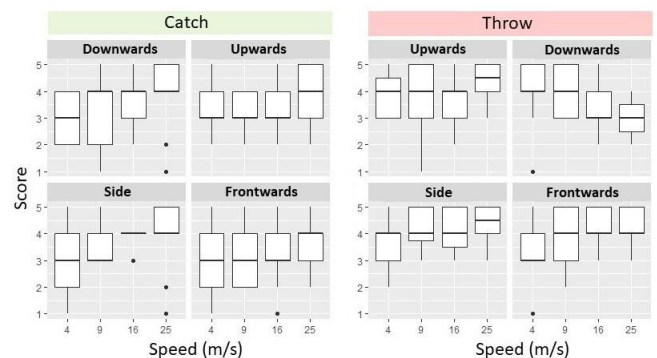


图17.任务2在4个方向上以不同的速度抓取和投掷的结果。

**捕捉：**参与者认为捕捉的触觉体验很真实（图17），平均得分3.5分。



$\pm 1$  (平均值, SD)。在球的方向上没有发现明显的差异, 尽管从前面来的球被认为不太真实 (平均得分=3.3), 很可能是因为设备的人体工程学。参与者认为接住更快的球更逼真 (皮尔逊相关性为 $r=0.25$ ,  $p<0.01$ )。我们没有模拟重力, 如果是慢球, 重力可能会更明显。

**投掷。**参与者认为投掷的触觉体验比接球的触觉体验更真实 (Wilcoxon 签名等级配对测试 $P<0.001$ ), 平均得分是 $4\pm 1$  (平均值, SD)。其原因可能是之前描述的自我生成的动作对触觉接受的重要性[5]。在向侧面、上面和前面投掷的真实感方面没有发现明显的差异。只有在向下的方向, 我们发现了一个显著的负相关 ( $r=-0.31$ ,  $p<0.05$ )。要了解这种影响, 还需要进一步调查。对于其他三个方向, 速度和真实性的相关性保持不变: 投掷的速度越快, 看起来越真实 (Pearson 相关性 $r=0.24$ ,  $p<0.01$ )。

在实验的虚拟部分结束后参与者填写的问卷中, 参与者同意接球 (Q6: "投掷感觉真实", 平均值=5.6, SD=0.6,  $P<0.01$ ) 和投球 (Q7: "接球感觉真实", 平均值=5.4, SD=0.5,  $P<0.001$ ) 感觉真实的说法。他们对这些陈述的评分从1 (完全不同意) 到7 (完全同意)。

### 任务3: 对重量的感知

在最后一项任务中, 我们测量了PIVOT产生重量感的能力。我们要求参与者抓住三个不同的虚拟球, 并选择他们认为最重的一个和最轻的一个 (图18)。参与者通过向上、向下握住球, 转动球, 并通过上下运动来自然地评估球的重量。呈现的物体重量为90克、200克和300克 (在手柄杆末端施加的力)。同样, 如图5所示, 该设备只呈现了重力与手掌平面的垂直分量。这导致手掌朝上或朝下时有充分的重量感, 而在这两者之间的位置上, 重量感会相应地减少。



图18.任务3: 参与者被展示了三个虚拟球 (90克、180克、270克)。他们必须估计它们的重量, 并选出最重和最轻的。

球的重量是随机分配给每个参与者的。参与者完成任务后, 仍然在

我们要求他们将虚拟物体与他们自己选择的一些真实物体 (例如, 手机、杯子、铅笔、鞋子、钥匙、网球、巧克力棒、水瓶) 进行比较。

### 结果

参与者在83%的情况下正确选择了最重的球。最轻的球在91%的情况下被正确选择。根据伯努利试验和三球的贝叶斯定理, 参与者没有随机分配球 (二项式检验的意义 $P<0.05$ )。

图19显示, 参与者对球的实际重量有很好的感觉。参与者将轻球 (90克) 与大约这个重量的真实物体进行比较 (真实物体的重量在50-150克之间, 例如参与者5将其与大约60克的网球进行比较)。参与者对重球的估计具有类似的准确性 (真实物体的重量在200-500克之间)。总的来说, 有一个轻微的倾向, 就是高估了重量。这可能是一种正常的人类倾向或疲劳效应。有两个参与者在过度估计方面明显属于异常值。

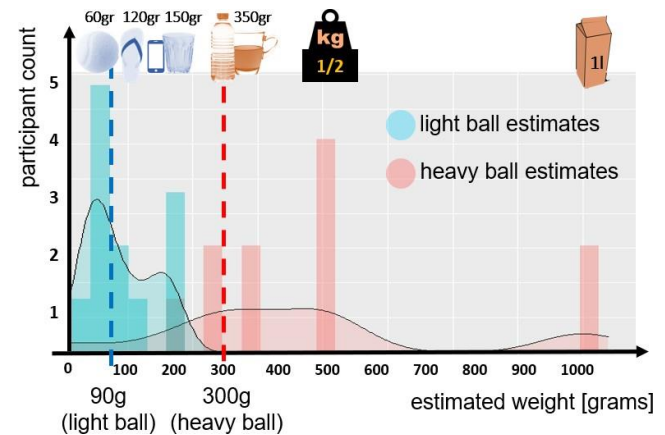


图19.任务3的结果: 参与者对最轻和最重的球的主观重量估计 (虚线表示呈现的重量PIVOT)。

在实验的虚拟部分结束后的问卷调查中, 参与者表示他们清楚地感知到了重量的不同 (Q5: "我能感觉到物体重量的不同", 平均值=5.08, std=0.33,  $p<0.015$ )。在研究过程中, 没有一个参与者报告说被袖带对他们前臂施加的反作用力所干扰。我们假设在呈现较大的力的情况下, 这种影响会变得更加突出。

总的来说, 这项研究证明了PIVOT的主要能力, 即在时间和空间上抓取物体, 并增加了诸如重量和力等动态因素。它还揭示了它的一些局限性, 以及它在产生真实的触觉效果方面的多功能性。

### 探索性原型

为了探索腕部安装设计的可能性, 我们在早期创造了许多原型, 其中两个如图20所示。在图20a中, PIVOT的手柄上加装了一个商用Windows混合现实VR控制器。这

是一个直接的功能设计；然而，控制器的形状在模拟抓取各种物体方面不太令人满意。

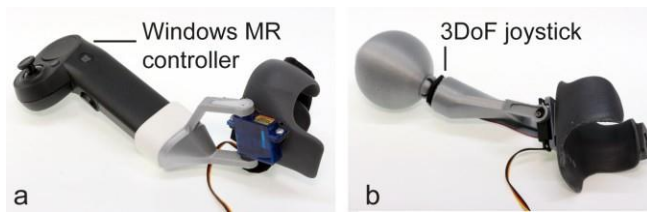


图20.探索性原型：(a) PIVOT的机构加装了一个Windows混合现实控制器，(b) PIVOT配备了一个3DoF操纵杆球，可以进行灵巧的导航。

图20b显示了PIVOT的一个版本，它配备了一个可以弯曲和旋转的3DoF操纵杆球。这种输入机制可以在VR中实现灵巧的输入，另外，由于操纵杆球和前臂之间的松散耦合，使得抓取的VR物体在手中感觉不那么拘谨。然而，由于手柄和电机之间的松散耦合，这个原型使得力的渲染不那么真实。

#### 局限性和未来工作

在对PIVOT的设计进行迭代，并对其进行评估的同时，我们的

在研究中，我们发现了几个需要改进的地方。

在机械方面，PIVOT的设计很结实，与佩戴者的手臂对齐，以便不与现实世界的物体发生互动。然而，长时间佩戴该设备（1小时以上）可能会导致手臂麻木的感觉，而传统的手持式控制器则不会出现这种情况。未来的版本可以通过减轻重量来缓解这一问题，例如，用VIVE追踪器代替。

目前，手的侧向运动仅由适应手的自然位置的手柄的被动绕轴旋转来解决。然而，在极端的手部旋转中，手柄可能不会准确地落在用户的手掌中。如果手柄由于任何原因没有被用户抓住，系统会自然地恢复，不把虚拟物体连接到用户的手上，并留下再次尝试的机会。更好地瞄准手掌可以通过在设备上增加一个或多个电动关节来解决。然而，这也会增加设备的复杂性和成本。

当使用PIVOT作为指点设备时（例如作为补充视频中的聚光灯），用户的手腕运动仍然被限制在大约 $\pm 30^\circ$ 的屈伸和辐射方向上。这种限制可以通过使用图20b所示的设计来缓解，在该设计中，握力球被安装在一个允许进一步3DoF运动的操纵杆上。

手柄的固定尺寸限制了有效近似物体的范围。因此，当物体的形状过于不协调时，可互换的手柄可以是

与形状改变技术相结合，如在控制器上增加不同形状和纹理的盖子，或在手柄上增加充气口袋，与[11]和[20]类似。

在交互层面上，我们看到了进一步增强PIVOT的潜力，以感知更多的用户输入来告知其行为。例如，在未来的版本中，整合手柄周围的手指追踪（例如，通过自电容阵列[32]或可穿戴相机[27]）可以在交互过程中更好地接近用户的手掌和手指，并为灵巧的输入提供触觉反馈。此外，通过应变仪感知手柄上的应用扭矩可以帮助PIVOT的力呈现的准确性。

#### 结论

在本文中，我们提出了一种用于AR和VR场景的新型互动触觉设备。与现有的商业控制器和最近研究项目中提出的触觉设备不同，PIVOT提出了一种动态出现和消失用户手掌中的触觉代理的方法。这使得引人注目的触觉效果和力的呈现，以及与现实世界中的物理物体的自由互动成为可能。实现PIVOT独特能力的是一个以前臂为基础的旋转机制，它可以根据需要将手柄旋转到用户的手掌上或从手掌中取出。我们在本文中展示了这一关键功能的几个使用案例，如抓取、捕捉和投掷虚拟物体，PIVOT以模拟的方式进行渲染。此外，我们的控制器能够渲染被抓物体所排泄的动态力量。在我们的用户研究中，参与者将PIVOT的使用评价为一个现实的代理，并强调了设计的人机工程学，使他们感觉他们的手与物体直接接触。这些结果支持了PIVOT的未来使用潜力。

#### 参考文献

- [1] Tomohiro Amemiya和Taro Maeda.2008.不对称振荡扭曲了对手持物体重量的感知。 *IEEE Transactions on Haptics* 1, 1, 9-18.
- [2] Bruno Araujo, Ricardo Jota, Varun Perumal, Jia Xian Yao, Karan Singh, and Daniel Wigdor.2016.蛇蝎美人。物理启用的虚拟对象。在《TEI '16：第十届有形、嵌入式和具身交互国际会议（TEI'16）》中。ACM, New York, NY, USA, 218-226. <https://doi.org/10.1145/2839462.2839484>
- [3] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D. Wilson.2016.触觉重定位。被动触觉的动态再利用以增强虚拟现实体验。在2016年CHI计算系统中人的因素会议（CHI'16）论文集中。美国计算机协会，纽约，美国，1968-1979. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858226>
- [4] Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair, and Eyal Ofek.2016.NormalTouch和TextureTouch: High-

- 手持式虚拟现实控制器上的保真三维触觉形状渲染。第29届用户界面软件和技术年度研讨会论文集, 717-728。 <http://doi.org/10.1145/2984511.2984526>
- [5] Christopher C. Berger, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Ken Hinckley.触觉的不可思议的谷底。2018.Science Robotics 3,17 (4 2018). <https://robotics.sciencemag.org/content/3/17/eaar7010>
- [6] Mourad Bouzit, George Popescu, Grigore Burdea, and Rares Boian.2002.Rutgers Master II-ND力反馈手套。在第十届虚拟环境和远程操作系统触觉接口研讨会上。HAPTICS 2002, 第145-152页。IEEE, 2002.
- [7] Lung-Pan Cheng, Thijs Roumen, Hannes Rantzsch, Sven Köhler, Patrick Schmidt, Robert Kovacs, Johannes Jasper, Jonas Kemper, and Patrick Baudisch.2015.Turkdeck:基于人的物理虚拟现实。In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST'15)*, pp.2015. <https://doi.org/10.1145/2807442.2807463>
- [8] Lung-Pan Cheng, Eyal Ofek, Christian Holz, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson.2017.Sparse Haptic Proxy:在虚拟环境中使用一般被动道具的触摸反馈。在2017年CHI会议上, 计算系统中的人类因素 (CHI '17)。Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3718-3728. DOI:<https://doi.org/10.1145/3025453.3025753>
- [9] Inrak Choi, Elliot W Hawkes, David L Christensen, Christopher J Ploch, and Sean Follmer.2016.Wolverine:一个用于在虚拟现实中的可穿戴触觉界面。智能机器人和系统 (IROS), 2016 IEEE/RSJ国际会议, 986-993.
- [10] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz.2018.CLAW: 一个用于在虚拟现实中的抓取、触摸和触发的多功能手持触觉控制器。2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集, 654:1-654:13。 <http://doi.org/10.1145/3173574.3174228>
- [11] Dhruv Jain, Misha Sra, Jingru Guo, Rodrigo Marques, Raymond Wu, Justin Chiu, and Chris Schmandt.2016.使用虚拟现实的沉浸式水肺潜水模拟器。第29届用户界面软件和技术年度研讨会论文集 (UIST '16).计算机协会, 美国纽约, 纽约, 729-739. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984519>
- [12] Yaesol Kim, Hyun Jung Kim, Young J. Kim.使用每个平面可及性的大型VR环境的遭遇型触觉显示地图。Comput Anim Virtual Worlds.2018; 29:e1814. <https://doi.org/10.1002/cav.1814>
- [13] Sang-won Leigh和Pattie Maes. 2016.身体集成可编程关节接口。在2016年CHI计算系统中的人的因素会议 (CHI '16) 的论文集中。美国计算机协会, 纽约, 美国, 6 053-6057. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858538>
- [14] Sang-won Leigh和Pattie Maes. 2017.形态学界面。关于身体改造的技术。在2017年CHI会议关于计算系统中人的因素的扩展摘要 (CHI EA '17) 中。Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 896-906. DOI:<https://doi.org/10.1145/3027063.3052758>
- [15] Dominik Schmidt, Rob Kovacs, Vikram Mehta, Udayan Umaphathi, Sven Köhler, Lung-Pan Cheng, and Patrick Baudisch.2015.Level-Ups.模拟虚拟现实中楼梯台阶的电动高跷。在第3届ACM计算系统中人的因素年会 (CHI '15) 论文集中。美国计算机协会, 纽约, 美国, 2 157-2160. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702253>
- [16] Mike Sinclair, Michel Pahud, and Hrvoje Benko.2013.TouchMover:带触觉反馈的3D触摸屏。在2013年ACM国际交互式平板电脑和表面会议 (ITIS '13) 的论文集中。ACM, New York, NY, USA, 287-296.DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2512349.2512805>
- [17] Mike Sinclair, Eyal Ofek, Mar Gonzalez-Franco, and Christian Holz.2019.CapstanCrunch:一个具有用户提供的力反馈的触觉VR控制器。在第32届ACM用户界面软件和技术研讨会 (UIST '19) 论文集中。Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 815-829. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347891>
- [18] Ryo Suzuki, Hooman Hedayati, Clement Zheng, James Bohn, Daniel Szafir, Ellen Yi-Luen Do, Mark D Gross, and Daniel Leithinger.2020.房间转变。房间规模的动态触觉与家具移动群机器人的VR。在2020年CHI会议上, 计算系统中的人为因素 (CHI '20)。美国计算机协会, 纽约, 美国。 <https://doi.org/10.1145/3313831.3376523>
- [19] Alexa F. Siu, Mike Sinclair, Robert Kovacs, Eyal Ofek, Christian Holz and Edward Cutrell.2020.没有视觉的虚拟现实。一个触觉和听觉的白手杖来导航复杂的虚拟世界。在2020年CHI计算系统中人的因素会议 (CHI '20) 的论文集中。美国计算机协会, 纽约, 美国。 <https://doi.org/10.1145/3313831.3376353>



- [20] Shan-Yuan Teng, Tzu-Sheng Kuo, Chi Wang, Chihuan Chiang, Da-Yuan Huang, Liwei Chan, and Bing-Yu Chen. 2018. PuPoP: Pop-up Prop on Palm for Virtual Reality. 在 *第31届ACM用户界面软件和技术研讨会 (UIST '18)* 的论文集中。美国计算机协会, 纽约, 美国, 5-17. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242628>
- [21] Xavier de Tinguy, Claudio Pacchierotti, Mathieu Emily, Mathilde Chevalier, Aurélie Guignardat, Morgan Guillaudeux, Chloé Six, Anatole Lécuyer, 和 Maud Marchal. "有形物体和虚拟物体可以有多大不同, 同时感觉又是一样的?" 在 *2019年IEEE世界触觉会议 (WHC)* 上, 第580-585页。IEEE, 2019年。
- [22] Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, 等. 2011. 五指触觉界面机器人。HIRO III. *IEEE Transactions on Haptics* 4, 1, 14-27.
- [23] Cathy Fang, Yang Zhang, Matthew Dworman & Chris Harrison. 2020. Wireality: 用穿戴式多线触觉技术在虚拟现实实现复杂的有形几何图形。在 *2020年CHI计算系统中人的因素会议 (CHI '20)* 论文集中。ACM.
- [24] FinalIK. 根部运动。2020年4月17日, 从 <http://www.root-motion.com/final-ik.html>
- [25] Massimiliano Gabardi, Massimiliano Solazzi, Daniele Leonardi, and Antonio Frisoli. 2016. 一种新的可穿戴指尖触觉界面, 用于渲染虚拟形状和表面特征。In *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. IEEE, 2016年。
- [26] Tobias Grosse-Puppenthal, Christian Holz, Gabe Cohn, Raphael Wimmer, Oskar Bechtold, Steve Hodges, Matthew S. Reynolds, and Joshua R. Smith. 2017. 寻找共同点。人机交互中的电容感应调查。在 *2017年CHI计算系统中人的因素会议 (CHI '17)* 论文集中。acm, 3293- 3315. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025808>
- [27] Sean Gustafson, Christian Holz, and Patrick Baudisch. 2011. 想象中的电话: 通过从熟悉的设备转移空间记忆来学习想象中的界面。在 *第24届ACM用户界面软件和技术年度研讨会 (UIST '11)* 论文集中。ACM, New York, NY, USA, 283-292. DOI: <https://doi.org/10.1145/2047196.2047233>
- [28] 顾晓琪, 张逸飞, 孙伟泽, 边远哲, 周道, 和 Per Ola Kristensson. 2016. Dexmo: 用于VR中运动捕捉和力反馈的廉价和轻量级机械外骨骼。 *2016年CHI计算系统中人的因素会议论文集*, ACM, 1991-1995. <http://doi.org/10.1145/2858036.2858487>
- [29] Haptix VR手套。Haptix公司。2020年4月17日, 检索到 <https://haptix.com/>
- [30] Seongkook Heo, Christina Chung, Geehyuk Lee, and Daniel Wigdor. 2018. 雷神之锤。一个利用螺旋桨诱导的推进力的无接地力反馈装置。 *2018年CHI计算系统中人的因素会议论文集*, 525:1--525:11. <http://doi.org/10.1145/3173574.3174099>
- [31] Ronan Hinchet, Velko Vechev, Herbert Shea, and Otmar Hilliges. 2018. DextrES. 通过薄型静电制动器在VR中抓取的可穿戴触觉反馈。在 *第31届ACM用户界面软件和技术研讨会 (UIST '18)* 的论文集中。ACM, New York, NY, USA, 901-912. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242657>
- [32] Ken Hinckley, Seongkook Heo, Michel Pahud, Christian Holz, Hrvoje Benko, Abigail Sellen, Richard Banks, Kenton O'Hara, Gavin Smyth, and William Buxton. 2016. 用于移动交互的预触摸感应。在 *2016年CHI计算系统中人的因素会议 (CHI '16)* 论文集中。ACM, New York, NY, USA, 2869-2881. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858095>
- [33] 黄新宇, 宁志伟, 王宝瑶 (大同), 郑仁浩, 和 郑龙潘。2020. Haptic-go-round: 一个用于虚拟现实体验中遭遇型触觉的环绕平台。在 *2020年CHI计算系统中人的因素会议 (CHI EA '20)* 的扩展摘要中。美国计算机协会, 纽约, 美国, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1145/3334480.3383136>
- [34] Seungwoo Je, Myung Jin Kim, Woojin Lee, Byungjoo Lee, Xing-Don Yang, Pedro Lopes, and Andrea Bianchi. 2019. 空中飞机。一个在虚拟二维平面上呈现重量运动幻觉的手持式力反馈设备。在 *第32届ACM用户界面软件和技术研讨会 (UIST '19)* 论文集中。美国计算机协会, 美国纽约, 763-775. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347926>
- [35] Rebecca P Khurshid, Naomi T Fitter, Elizabeth A Fedalei, and Katherine J Kuchenbecker. 2017. 握力、接触和加速度反馈对远程操作的拾取和放置任务的影响。 *IEEE触觉交易* 10, 1, 40-53.
- [36] Jaeyeon Lee, Mike Sinclair, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Christian Holz. 2019. TORC: 用于手部高灵巧手指交互的虚拟现实控制器。 *2019年CHI计算系统中人的因素会议论文集*.

- [37] CyberGrasp. *CyberGlove Systems LLC*. 2020年4月17日, 从<http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp/>
- [38] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury. 1994. 幻影触觉界面。一个探测虚拟物体的装置。 *ASME 冬季年会论文集, 虚拟环境和远程操作系统的触觉界面研讨会*, Citeseer, 295-300.
- [39] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. 2007. 重力抓取器: 可穿戴的触觉显示器, 以呈现虚拟的质量感。 *ACM SIGGRAPH 2007 新兴技术*, ACM. <http://doi.org/10.1145/1278280.1278289>
- [40] Jun Murayama, Laroussi Bougrila, YanLin Luo, et al. 2004. SPIDAR G&G: 一个用于双臂VR交互的双手触觉界面。 *EuroHaptics 论文集*, Citeseer, 138-146.
- [41] Martin Murer, Bernhard Maurer, Hermann Huber, Ilhan Aslan, and Manfred Tscheligi. 2015. 扭力屏。用于手持设备中未接地的触觉反馈的致动飞轮。 *第九届有形、嵌入式和具身交互国际会议论文集*, ACM, 161-164.
- [42] Plexus 手套。 *Plexus Immersive Corp*. 2020年4月17日, 检索到<http://www.plexus.im>
- [43] Domenico Prattichizzo, Francesco Chinello, Claudio Pacchierotti, and Monica Malvezzi. 2013. 实现指尖触觉的可穿戴性。一个用于皮肤力反馈的3-DoF可穿戴设备。 *IEEE Transactions on Haptics* 6, 4, 506-516. <http://doi.org/10.1109/TOH.2013.53>
- [44] José-Luis Rodríguez, and Ramiro Velázquez. 2012. 用Novint Falcon进行虚拟形状的触觉渲染。 *Procedia Technology* 3 (2012):132-138.
- [45] Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. 2019. Transcalibur: 一个基于计算感知模型的二维形状渲染的重量转移虚拟现实控制器。在 *2019 年CHI 计算系统中人的因素会议 (CHI '19) 论文集*中。ACM, 美国纽约州纽约市, 论文11, 11页。DOI: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300241>
- [46] 孙玉倩, 吉田茂雄, 成实拓二, 广濑道隆。 2019. PaCaPa: 用于渲染基于工具的交互中的虚拟对象的尺寸、形状和刚度的手持VR设备。在 *2019 年CHI 计算系统中人的因素会议 (CHI '19) 论文集*中。美国计算机协会, 纽约, 美国。论文452, 1-12。 <https://doi.org/10.1145/3290605.3300682>
- [47] Teensy 微控制器。 2020年4月17日 检索 <https://www.pjrc.com/store/teensy36.html>
- [48] Timothy M Simon, Ross T Smith, and Bruce H Thomas. 2014. 用于虚拟环境触觉的可穿戴干扰手套。 *2014 年 ACM 可穿戴计算机国际研讨会论文集*, ACM, 67-70.
- [49] Evan Strasnick, Christian Holz, Eyal Ofek, Mike Sinclair, and Hrvoje Benko. 2018. Haptic Links: 使用可变刚度驱动的虚拟现实的双手触觉。在 *2018 年 CHI 计算系统中的人的因素会议 (CHI'18)* 上, 644 : 1-644 : 12. <http://doi.org/10.1145/3173574.3174218>
- [50] Colin Swindells, Alex Uden, and Tao Sang. 2003. TorqueBAR: 一个未接地的触觉反馈装置。 *第五届多模态界面国际会议论文集*, ACM, 52-59.
- [51] Daria Trinitatova, Dzmitry Tsetserukou, and Aleksei Fedoseev. 2019. TouchVR: 一个可穿戴的VR触觉界面, 旨在为用户的手掌提供多模式的刺激。在 *SIGGRAPH 亚洲 2019 XR (SA '19)*。计算机协会, 美国纽约, 纽约, 美国, 42-43. DOI: <https://doi.org/10.1145/3355355.3361896>
- [52] Vive Pro 控制器。 *HTC 公司*. 2020年4月17日, 检索到 <https://www.vive.com/>
- [53] Julie M Walker, Heather Culbertson, Michael Raitor, and Allison M Okamura. 2018. 使用两个平行的双平衡控制矩陀螺仪的触觉方向引导。 *IEEE 触觉交易* 11, 2, 267-278.
- [54] Eric Whitmire, Hrvoje Benko, Christian Holz, Eyal Ofek, and Mike Sinclair. 2018. Haptic Revolver: 在可重新配置的虚拟现实控制器上进行触摸、剪切、纹理和形状渲染。 *2018 年 CHI 计算系统中的人的因素会议 (CHI'18) 论文集*, 86:1-86:12. <http://doi.org/10.1145/3173574.3173660>
- [55] Andre Zenner, Antonio Kruger. 2017. Shifty: 一个移重的动态被动触觉代理, 以增强虚拟现实中的物体感知。 *IEEE Visualization and Computer Graphics Transactions* 23, 4, 1285-1294. <http://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2656978>
- [56] André Zenner, Antonio Krüger. 2019. Drag: on: 一个提供基于阻力和重量转移的触觉反馈的虚拟现实控制器。在 *2019 年 CHI 计算系统中的人的因素会议 (CHI '19) 的论文集*。ACM, 纽约州纽约市。

美国, 211号文件, 12页。 <https://doi.org/10.1145/3290605.3300441>

- [57] 赵宇航, Cynthia L. Bennett, Hrvoje Benko, Edward Cutrell, Christian Holz, Meredith Ringel Morris, 和Mike Sinclair。2018.让有视觉障碍的人能够用触觉和听觉的手杖模拟来导航虚拟现实。在*2018年CHI会议上, 关于人的因素的论文*。计算系统 (CHI '18)。ACM, New York, NY, USA, Paper 116, 1-14. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173690>
- [58] Igor Zubrycki和Grzegorz Granosik。2017.使用干扰原理的新型触觉装置, 用于在基于手套的控制界面中提供动觉反馈。《*智能与机器人系统杂志*》85, 3-4, 413-429.